

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУИ ГАЗА

Вахитов Ю.Р., Черноусов А.А., Морозов К.Г.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Приводится математическая модель расчета уровня шума нестационарной струи газа, вытекающей из открытого конца трубопровода.

В настоящее время математические модели акустических характеристик двигателя основываются в значительной степени на эмпирических зависимостях.

Целью данной работы являлась разработка и обоснование математической модели акустических характеристик нестационарной струи газа, вытекающей из открытого конца трубопровода и проверка ее адекватности. Разработанная модель может использоваться для расчета шума нестационарных струй газа и, в частности, шума выхлопа двигателя внутреннего сгорания.

В ДВС результате периодического открытия выпускного органа в выпускном трубопроводе возникают возмущения (волны), которые, достигнув границы "трубопровод-окружающая среда", инициируют газодинамические возмущения, переходящие затем в акустические. Определение акустической характеристики струи по предлагаемой модели включает расчеты нестационарного течения газа по трубопроводу, истечения газа в атмосферу и уровня шума в заданной точке пространства.

Проверка модели проводилась на тестовой задаче истечения в атмосферу через трубопровод уединенной волны конечной амплитуды (рисунок 1). Уединенная волна создавалась генератором волн, имитирующим один цикл выпуска в ДВС.

Расчет нестационарного течения газа по трубопроводу и в окрестности среза трубопровода проводился численным интегрированием уравнений газовой динамики. Для течения в трубопроводе использовалась система уравнений сохранения в одномерном приближении для канала постоянного сечения:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial x} = \bar{S}, \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad \bar{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u(\rho E + p) \end{bmatrix}, \quad \bar{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_w \Pi / F \\ q_w \Pi / F \end{bmatrix},$$

где $\tau_w \frac{\Pi}{F} = -\lambda \frac{\rho u|u|}{2d_r}$, $q_w \frac{\Pi}{F} = \lambda \frac{\rho|u|}{2d_r} c_p (T_w - T^*)$ – напряжение трения и плотность теплового потока на стенке, выраженные через коэффициент трения для турбулентного течения;

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8.$$

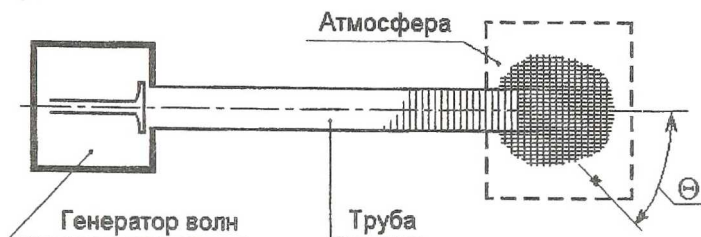


Рисунок 1 - Схема течения и расчетная сетка

Система уравнений сохранения аппроксимировалась двухшаговой по времени разностной схемой типа Годунова:

$$\bar{U}_i^{(1)} = \bar{U}_i^n + \Delta t L^h(\bar{U}_i^n),$$

$$\bar{U}_i^{n+1} = \frac{1}{2} \bar{U}_i^n + \frac{1}{2} \bar{U}_i^{(1)} + \frac{1}{2} \Delta t L^h(\bar{U}_i^{(1)}), \quad (1)$$

где
$$L_1^h(\bar{U}_i) = \frac{\bar{E}_{i-\frac{1}{2}} - \bar{E}_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \bar{S}_i. \quad (2)$$

Для моделирования процесса течения в окрестности среза трубопровода вводилась двумерная сетка, начинавшаяся с расстояния в несколько ячеек до среза трубопровода и продолжавшаяся в окружающем пространстве за срезом (см. рисунок 1). В месте сопряжения одномерной и двумерной сеток ставились надлежащие условия сопряжения. В двумерной подобласти течение рассчитывалось по уравнениям сохранения газовой динамики в осесимметричной постановке:

$$\frac{\partial(r\bar{U})}{\partial t} + \frac{\partial(r\bar{E})}{\partial x} + \frac{\partial(r\bar{F})}{\partial r} = \bar{f},$$

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(\rho E + p) \end{bmatrix}, \bar{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ v(\rho E + p) \end{bmatrix}, \bar{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для решения уравнений (3) применялась также двухшаговая по времени система Годунова повышенного порядка аппроксимации по пространству типа (1) с разностным оператором

$$L_2^h(\bar{U}_{i,j}) = \frac{1}{r_{i,j}} \left\{ \frac{(\bar{E}r)_{i-\frac{1}{2}} - (\bar{E}r)_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{(\bar{F}r)_{i,j-\frac{1}{2}} - (\bar{F}r)_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta r} + \tilde{f}_{i,j} \right\}, \quad (4)$$

в котором, как и в формуле (2), для расчета потока на границе ячейки на каждом слое по времени использовались кусочно-параболические распределения полей характеристических параметров с ограничительной функцией $\min\text{mod}(x,y)$ [2] и классическая процедура решения задачи о распаде разрыва на границе [1].

Нестационарно вытекающая струя газа инициирует в окружающем пространстве не только акустические волны, но и пространственные волны сжатия. Поэтому уровень шума в любой точке пространства определяется с учетом этих двух составляющих.

Звуковая мощность истекающей струи газа определялась по формуле Лайтхилла [3]: $W = 9 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_C^2 \cdot U_C^6 \cdot F}{\pi \cdot \rho_0 \cdot a_0^3}$, (5)

где ρ_0 – плотность газа в окружающей среде;

a_0 – скорость звука в окружающей среде;

F – площадь сечения выпускного трубопровода;

U_C – скорость газа в струе;

ρ_C – плотность газа в струе.

Значения параметров U_C и ρ_C были получены из одномерного расчета движения газа по трубопроводу. Уровень звуковой мощности

истекающей струи
$$e = 10 \lg \frac{W}{W_0}, \quad (6)$$

где W_0 – пороговое значение звуковой мощности, $W_0 = 10^{-12}$ Вт.

Уровень шума в точке, расположенной под углом Θ к оси струи на расстоянии r от среза выпускного трубопровода определялся как

$$L_{СТР} = e - 10 \lg(2\pi r^2) + 10 \lg \Phi, \quad (7)$$

где Φ – фактор направленности:

$$10 \lg \Phi = 10 \lg((1 - M_K \cos \Theta)^{-3} (1 - M_K^n \cos \Theta^5)^m) - b M_K^{0,5},$$

$$M_K = 0,6 M_C,$$

$$n = 0,3(1 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T),$$

$$m = 0,1(1 + 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta T),$$

$$b = 5(1 + 10^{-3} \cdot \Delta T),$$

$$\Delta T = T_C^* - 273,15,$$

T_C^* - температура торможения в струе.

Уровень давления, создаваемый волной сжатия в точке пространства

$$L_B = 20 \lg \frac{p_B}{p_0}, \quad (8)$$

где p_B – избыточное давление в точке, Па,

p_0 – пороговое значение звукового давления, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Величина избыточного давления находилась из расчета двумерного течения газа. Суммарный уровень шума в точке пространства определялся по следующему алгоритму.

Вначале вычислялось эквивалентное избыточное давление в заданной точке, которому соответствует уровень шума струи, рассчитанный по формуле (7):

$$p_{ЭКВ} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_{стр}}{20}}. \quad (9)$$

Затем определялось давление в этой же точке по формуле

$$p = \sqrt{p_B^2 + p_{ЭКВ}^2} \quad (10)$$

и по давлению p рассчитывался уровень шума.

Адекватность математической модели, оценивалась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных на модельной установке. В эксперименте уровень шума измерялся с помощью импульсного шумомера 000027 фирмы RFT (погрешность измерения ± 1 дБ) на расстоянии 500 мм от среза трубопровода под углами Θ от 30° до 90° к оси трубопровода. Погрешность измерения Эксперимент проводился с уединенными волнами сжатия конечной амплитуды интенсивностью $\Delta p = 30$ кПа. В расчетах использовалась прямоугольная сетка с размером ячейки 0,5 мм.

Измеренные в эксперименте уровни шума оказались на 4 - 6 дБ выше, чем расчетные уровни.

Список литературы

1. Годунов С. К., Забродин А. В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
2. Иванов М. Я., Крупа В. Г., Нигматуллин Р. З. Неявная схема С. К. Годунова повышенной точности для интегрирования уравнений Навье-Стокса. // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29. № 6. С. 888-901.
3. Аэродинамические источники шума./ А.Г. Муни, В.М. Кузнецов, Е.А. Леонтьев. – М.:Машиностроение, 1981. – 248 с.